

INFLUENCE OF PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF HAZARDOUS SOLID WASTE INCINERATION ASHES (HSWIA) ON LANDFILL LEACHATE FILTRATION

M. C. C. MOURA¹, G. O. SANTOS, M. L. SILVA, R. A. C. SILVA, N. D. LEITE, J. B. S. BASTOS

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará¹

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-6679-0996>¹

mcristina_cm@yahoo.com.br¹

Submetido 24/10/2023 - Aceito 31/11/2023

DOI: 10.15628/holos.2023.16328

ABSTRACT

The study examines the reuse of hazardous waste incineration ashes in landfill leachate treatment. Its objective is to assess how the particle size distribution of the ashes affects the reduction of physicochemical parameters in leachate at the Caucaia Sanitary Landfill in Ceará, Brazil, thus valorizing them and minimizing their disposal in landfills. Two filtration columns with ashes of different particle sizes (F1 sieved and F2 raw) were set up. Leachate collected from the landfill was analyzed before and after filtration, demonstrating

effectiveness in removing parameters such as phosphorus, nitrite, turbidity, nitrate, etc. The characterization of the ashes revealed differences between the samples, including varying levels of oxides and particle sizes. Results suggest potential use in pre-treatment to reduce pollutant loads before the primary treatment of leachate. The study underscores the potential of incineration ashes to enhance leachate treatment and reduce the environmental impact of improper disposal.

KEYWORDS: Ash from Hazardous Solid Waste Incineration, Particle Size Distribution, Landfill Leachate.

INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DAS CINZAS DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS (RSP) NA FILTRAÇÃO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO

RESUMO

O estudo analisa a reutilização das cinzas de incineração de resíduos perigosos no tratamento de lixiviado de aterro sanitário. O objetivo é avaliar como a granulometria das cinzas afeta a redução dos parâmetros físico-químicos dos lixiviados no Aterro Sanitário de Caucaia, Ceará, valorizando-as e minimizando o envio a aterros. Duas colunas de filtração com cinzas em diferentes granulometrias (F1 peneirada e F2 bruta) foram criadas. Lixiviado coletado no aterro foi analisado antes e após a filtração,

demonstrando eficácia na remoção de parâmetros como fósforo, nitrito, turbidez, nitrato etc. A caracterização das cinzas evidenciou diferenças entre as amostras, com variados teores de óxidos e granulometria. Resultados sugerem uso em pré-tratamento para reduzir a carga poluente antes do tratamento principal dos lixiviados. O estudo destaca o potencial das cinzas de incineração para melhorar o tratamento de lixiviado e reduzir o impacto ambiental do descarte inadequado.

PALAVRAS-CHAVE: Cinzas de incineração de resíduos perigosos, granulometria, lixiviados de aterro sanitário.

1 INTRODUÇÃO

O descarte de Resíduos Sólidos Perigosos (RSP) tem sido um desafio crescente, especialmente nas grandes cidades. Nesse sentido, a incineração tem se mostrado uma alternativa que reduz acentuadamente o peso (até 70%) e o volume (até 90%) dos resíduos por meio de um processo de combustão controlada (PINTO, 2018).

No Brasil, uma parte dos RSP é enviada para unidades de tratamento por incineração, autoclave, micro-ondas e aterros industriais (que representam as alternativas mais caras); outra parte segue para blendagem e/ou coprocessamento em fornos de cimenteiras (que são formas de aproveitá-los como insumos) e outra parte vem sendo enviada para aterros sanitários Classe IIA e/ou lixões (que não são adequados para RSP), agregando diversos riscos ambientais e sociais.

Em Fortaleza-CE, os geradores de RSP (independentemente do volume) são obrigados a assumir todos os custos pelos serviços de manejo (segregação, acondicionamento, armazenamento, transporte, tratamento, destinação e disposição final), conforme a Lei Municipal 10.430/2015 (FORTALEZA, 2015). Em geral, os geradores licenciados enviam seus RSP para incineração no Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos - CTRP, localizado no bairro Jangurussu, por meio de um contrato com uma transportadora especializada.

O incinerador de Fortaleza-CE foi inaugurado em 2001, tem tecnologia alemã, é do tipo leito fluidizado e possui duas câmaras (de 900 e 1000°C), conforme Viana (2013). Informações atualizadas apontam para o tratamento de nove toneladas de RSP por dia, garantindo a esterilização e redução de volume e peso. Ainda segundo os técnicos do CTRP, aproximadamente 98% correspondem a Resíduos de Serviço de Saúde - RSS e os outros 2% são resíduos industriais e outros (ambos classificados como RSP).

Um dos produtos da incineração é uma cinza (volante e de fundo) que precisa de cuidados especiais. Em Fortaleza-CE, ela é destinada ao Aterro Sanitário de Caucaia, localizado na Região Metropolitana.

Em várias partes do mundo, vem crescendo o esforço para aumentar a valorização das cinzas geradas em incineradores e reduzir seu envio aos aterros sanitários. Alguns estudos têm investigado sua aplicabilidade na construção de camadas de pavimentos (PATRA et al., 2017), na produção de cimento (CLAVIER et al., 2019), como agregado em concreto (LI et al., 2018), na incorporação em argamassas normais e adesivas (AGUIAR et al., 2002), em cerâmicas vermelhas (COUTINHO; VIEIRA, 2016), em misturas asfálticas e na síntese de materiais leves aerados ativadas por álcali (ZHU et al., 2018). Em Singapura, por exemplo, há significativo interesse na reutilização dessas cinzas, devido à escassez de terras e recursos (LIU et al., 2018). Por outro lado, pouco se sabe sobre o comportamento dessas cinzas como meio filtrante de soluções ou amostras líquidas contaminadas, a exemplo dos lixiviados de aterros sanitários, aumentando a necessidade de novas pesquisas.

De acordo com Silva et al. (2013), a filtração é uma operação que consiste na separação sólido-líquido, ou seja, as partículas sólidas são separadas mecanicamente de uma suspensão líquida por meio de um meio filtrante, e o líquido clarificado obtido nesse processo é chamado de filtrado. Assim, tal processo pode ser empregado no tratamento de diferentes tipos de efluentes.

Em geral, os lixiviados de aterros são tratados em lagoas de estabilização ou utilizando destilador solar (SÁ et al., 2012), reator biológico sequencial descontinuado (CHÁVEZ-PORRAS et al., 2018), filtros de areia (ROEHRS, 2007) ou processo de eletroflotação. Outro viés é o tratamento desses efluentes através do processo de biorremediação utilizando microorganismos (PESENTI et al., 2023), mas o tratamento de lixiviados em colunas de filtração compostas por cinzas da incineração de RSU ainda é desconhecido, o que motivou a realização dessa pesquisa (inédita no Brasil). Objetivou-se com este trabalho avaliar a influência da granulometria das cinzas da incineração de RSP na redução da concentração de parâmetros físicos e químicos do lixiviado do novo Aterro Sanitário de Caucaia.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), da Universidade Federal do Ceará (UFC), campus do Pici. Foram montadas duas colunas de filtração com tubos de PVC de 10cm de diâmetro e 50cm de altura. Na parte inferior do tubo, foi instalada uma tampa de PVC devidamente furada para permitir a saída do lixiviado passante. Dentro do tubo correspondente ao Filtro 1 (F1), foi utilizada cinza da primeira Campanha de Caracterização (CC1), previamente seca e caracterizada, apresentando granulometria entre 2,0mm e 1,2mm. No Filtro 2 (F2), foi utilizada cinza da segunda Campanha de Caracterização (CC2) bruta (não peneirada). Foram colocadas três camadas de 4cm de cinzas dentro do tubo e sobre cada camada aplicou-se a compactação com energia do Proctor Normal, 26 golpes. Também foram colocadas britas lavadas, com granulometria entre 9,5 e 12,5mm, como camada drenante (sob e sobre os meios filtrantes/cinzas compactadas) e tela de nylon (10cm de diâmetro e abertura 1,11mm), conforme a Figura 1. Assim, o experimento ficou com duas colunas com 100% de cinzas de RS, mas com granulometrias distintas.

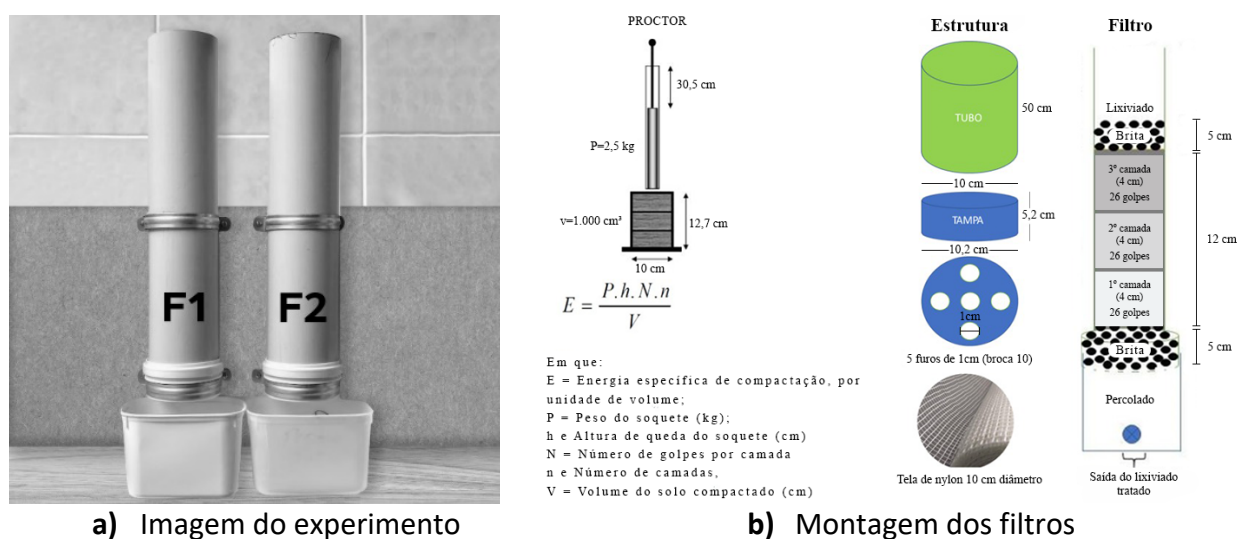


Figura 1: Filtros do experimento piloto.

As amostras das cinzas foram coletadas no incinerador de resíduos existente no CTRP, em Fortaleza-CE e, na ausência de normas específicas para caracterização de materiais antropogênicos

(no caso, resíduos), como também observaram Dijkstra et al. (2019), foram utilizados os métodos das Normas Técnicas aplicadas em solos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Resumo das análises das cinzas de RSP.

Análise	Referência ou Método	Local
Granulometria (05 amostras)	NBR 7181/2018	Laboratório de Mecânica dos Solos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFC
Compactação Proctor Normal (05 amostras)	NBR 7182/2020	
Teor de Umidade Natural da Amostra (05 amostras)	Estufa a 60-65°C por 24h	
Determinação da Massa Específica do Grão (05 amostras)	NBR 6458/2017	
Permeabilidade com Carga Variável (02 amostras)	NBR 14545/2021	
Permeabilidade com Carga Constante (02 amostras)	NBR 13292/2021	
Composição Química Elementar (05 amostras)	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X	Laboratório de Raios-X Departamento de Física, UFC
Propriedades de forma no AIMS (02 amostras)	Norma DNIT 432/2020 - ME	Laboratório de Geologia do Departamento de Geologia, UFC

O lixiviado bruto foi coletado na 2ª lagoa de estabilização do Aterro Sanitário e, assim como a lixiviado tratado, foi enviado para caracterização no laboratório do Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC) quanto aos cloretos, cor aparente, Demanda Química de Oxigênio - DQO, fósforo, nitrito, nitrato, pH, sólidos dissolvidos e turbidez, segundo o método *Standard Methods for the Examinations of Water and Wastewater* (APHA, 2017).

Cada filtro recebeu dois litros de lixiviado bruto (analisado no laboratório no mesmo dia da coleta no Aterro Sanitário). Por sua vez, o lixiviado tratado foi analisado depois de percolar pelas colunas de filtração, ou seja, 24 horas depois. Foram realizadas duas campanhas: uma em abril e outra em julho de 2022.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras utilizadas no F1 apresentaram compactação com Massa Específica Aparente Seca Máxima (MEAS_{máx}) de 1,610 g/cm³ e 12,42% para a média da Umidade Ótima (Hótima), teor de umidade natural de 2,14%, massa específica do grão de 2,714 e composição química elementar média de Óxido de Cálcio (57,41%), Óxido Férrico (16,43%) e Dióxido de Titânio (7,88%), dentre outros. As amostras usadas no F2 apresentaram compactação com MEAS_{máx} de 1,506 g/cm³ e 22,76% para a média da Hótima, teor de umidade natural de 22,16%, massa específica do grão de 2,367 e composição química elementar média de Óxido de Cálcio (58,20%), Óxido de Alumínio (8,28%) e Dióxido de Silício (7,84%), dentre outros.

As análises de permeabilidade e propriedades de forma foram realizadas apenas em amostras de CC2 (em função de problemas nos equipamentos), alcançando permeabilidade K₂₀ = 3,2 × 10⁻⁵ cm/s e propriedades de forma, segundo a classificação proposta por Ibiapina et al. (2018), para as cinzas graúdas: esfericidade = baixa esfericidade, angularidade = subarredondado, textura = macio; e para as cinzas miúdas: angularidade = subarredondado e forma 2D = semicircular.

A granulometria das duas amostras analisadas apresentou dimensão semelhante a areia (63,0%), sugerindo a formação de macroporos e dutos que possibilitam boa capacidade de infiltração. Para CC1, observou-se 22% de pedregulho, 22% de areia grossa, 27% de areia média e 12% de areia fina e 16% de silte/argila; e para CC2 observou-se 13% de pedregulho, 26% de areia grossa, 24% de areia média e 15% de areia fina e 23% de silte/argila.

O F1 (cinzas tratadas) teve capacidade de reduzir a concentração de seis parâmetros do lixiviado na primeira campanha (66,7% do total de parâmetros analisados) e de cinco parâmetros (55,6%) na segunda campanha (observação qualitativa). Nas duas campanhas, houve redução da concentração, coincidente, de quatro parâmetros (cor aparente, fósforo, DQO e turbidez). As maiores taxas de redução de concentração ocorreram para o fósforo e o nitrito na primeira campanha (100,0%), conforme a legenda da Tabela 2.

Tabela 2: Resultados da filtração do lixiviado no Filtro 1.

Parâmetros	Bruto	Bruto	Filtrado	%	Filtrado	%
	1ª C	2ª C	1ª C		2ª C	
pH à 25°C	8,10	8,12	9,32	15,1	9,01	11,0
Cloretos (mg/L)	3.180,00	2.968,94	4.740,00	49,1	3.403,20	14,6
Cor aparente (uH)	3.550,00	3.150,00	152,00	-95,7	1.170,00	-62,9
Fósforo (mg/L)	4,57	3,85	**< LQ	-100,0	0,14	-96,4
DQO (mg/L)	3.484,50	1.904,00	2.382,00	-31,6	463,40	-75,7
Sólidos dissolvidos (mg/L)	9.382,00	8.816,00	9.404,00	0,2	7.906,00	-10,3
Nitrato (mg/L)	6,19	*< LQ	1,03	-83,4	*< LQ	
Nitrito (mg/L)	0,08	*< LQ	*< LQ	-100,0	*< LQ	
Turbidez (mg/L)	370,00	195,00	14,32	-96,1	69,40	-64,4
			1ª C	%	2ª C	%
Resumo		Elevação	3	33,3	2	22,2
		Redução	6	66,7	5	55,6

	Manutenção	-	-	2	22,2
--	------------	---	---	---	------

* < LQ= menor que o limite quantificável

O F2 (cinzas brutas) teve capacidade de reduzir, em cada uma das campanhas, a concentração de seis parâmetros do (66,7% do total de parâmetros analisados). Nas duas campanhas houve redução na concentração, coincidente, de no mínimo cinco parâmetros (cor aparente, DQO, nitrato, nitrito e turbidez). A maior taxa de redução ocorreu com o nitrito (88,0% na primeira campanha e 89,4% na segunda campanha), conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Resultados da filtração do lixiviado no Filtro 2.

Parâmetros	Bruto	1ª C	%	2ª C	%
pH à 25°C	8,31	8,81	6,0	8,93	7,5
Cloretos (mg/L)	4.475,56	5.202,29	16,2	5.033,90	12,5
Cor aparente (uH)	2.370,00	1.900,00	-19,8	1.770,00	-25,3
Fósforo (mg/L)	0,74	0,33	-55,4	1,10	48,6
DQO (mg/L)	594,8	587	-1,3	310,00	-47,9
Sólidos dissolvidos (mg/L)	11.834,00	17.738,00	49,9	11.398,00	-3,7
Nitrato (mg/L)	0,33	0,26	-21,2	0,30	-9,1
Nitrito (mg/L)	2,84	0,34	-88,0	0,30	-89,4
Turbidez (mg/L)	264	173,7	-34,2	143,4	-45,7
		1ª Campanha	%	2ª Campanha	%
Resumo	Elevação	3	33,3	3	33,3
	Redução	6	66,7	6	66,7
	Manutenção	-	-	-	-

* < LQ= menor que o limite quantificável

Observa-se que as maiores taxas de redução, por parâmetro, ocorreram no F1, nas duas campanhas, evidenciando a influência granulométrica das cinzas utilizadas para o alcance dos melhores resultados que, mesmo após o intervalo de tempo decorrido entre as campanhas, continuaram com percentuais de redução elevados.

Uma análise mais detalhada, por parâmetro, permitiu observar que, apesar dos lixiviados brutos se mostrarem praticamente constantes (pH entre 8,1 e 8,3), houve elevação de até 15,1% do pH do lixiviado após filtração, tornando-o mais alcalino. Os lixiviados obtidos, nas duas campanhas de F1 estiveram fora dos limites da CONAMA e COEMA pertinentes (5 a 9), contudo os resultados apresentados por F2 ficaram dentro do permitido, Figura 3.

O comportamento do pH em processos de tratamento de lixiviados não tem tendência única, a saber: (i) Carard (2018), após aplicação do tratamento por ozonização fotocatalítica com dióxido de titânio, alcançou redução do pH em todos os ensaios promovidos; (ii) Godoi (2019), utilizando filtro de papel como meio filtrante, observou aumento do pH, após a filtragem, para a maioria das amostras; (iii) Silva et al. (2021) utilizaram areia de variadas granulometrias, argilas e carvão ativado

como meio filtrante e o pH do lixiviado; após filtração, não houve variação considerável em relação ao lixiviado bruto.

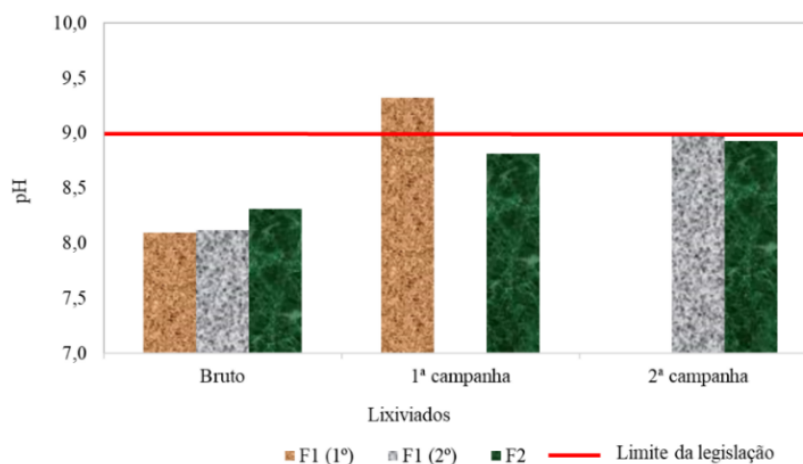


Figura 2: Comportamento do parâmetro pH.

Em aterros sanitários, o cloreto não está sujeito a transformações químicas ou biológicas, o que possibilita sua passagem pelas camadas mais antigas sem qualquer atenuação significativa (SOUTO, 2009). Portanto, a remoção desse parâmetro, dentre outros, é considerada de extrema importância para um bom tratamento do lixiviado (LEBRON et al., 2021). Houve elevação do cloreto no lixiviado tratado, possivelmente em decorrência de algum residual de cloro do processo de desinfecção, etapa operacional, realizada no incinerador estudado, sendo esta elevação mais acentuada no F1 na primeira campanha (49,1%). Rodrigues (2007), aplicando tratamento eletrolítico ao lixiviado de aterro sanitário, observou remoção de 16% do cloreto em relação ao lixiviado bruto, no entanto, ao adicionar sal ao efluente - antes do tratamento - os valores de cloreto aumentaram mais de 200%.

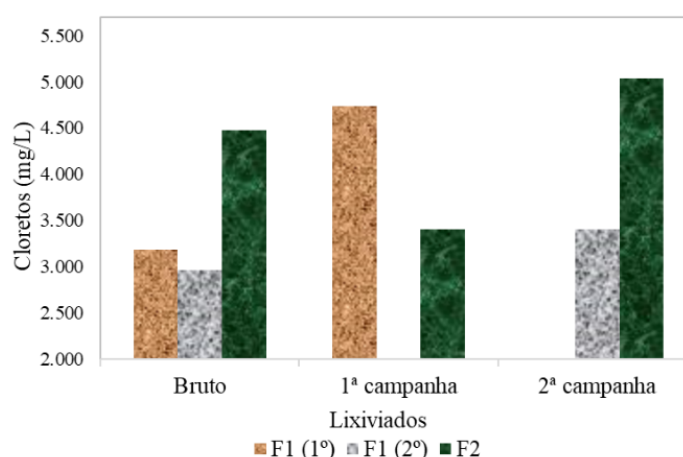


Figura 3: Comportamento do parâmetro Cloreto.

A cor aparente é um processo biológico que só ocorre quando há algum meio de transmissão da luz do sol pelo efluente, sendo considerado relevante no estudo da eficiência dos tratamentos (GODOI, 2019). Os dois filtros removeram a cor aparente, em especial o F1 (primeira campanha), alcançando 95,7% de redução. A remoção desse parâmetro físico (organoléptico) é de grande

relevância, sendo almejado como resultado. No tocante à exigência legal para o parâmetro, a COEMA nº 02 (CEARÁ, 2017) determina que efluentes não sanitários só poderão ser lançados diretamente no corpo hídrico, resguardadas outras exigências cabíveis, quando não apresentem a presença de corantes e pigmentos. Portanto, apesar da redução obtida, essa exigência legal não foi alcançada pelo método utilizado neste estudo.

O tratamento aplicado por Carard (2018), ozonização fotocatalítica com dióxido de titânio, possibilitou a remoção de cor aparente do lixiviado de até 61%. Por sua vez, Fujii et al. (2019) alcançaram remoção de até 99,7% por meio de ensaios de coagulação seguida de filtração ascendente em pedregulho como pós-tratamento.

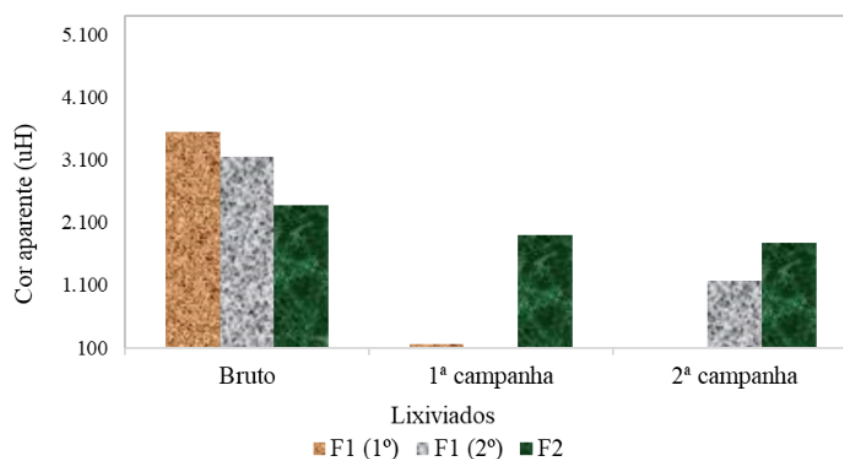


Figura 4: Comportamento do parâmetro Cor Aparente.

A quantidade do elemento químico fósforo, liberado na degradação da matéria orgânica presente em efluentes, tem origem principalmente antropogênica. É um elemento essencial para os seres vivos, pois compõe as membranas celulares, os ácidos nucleicos, os ossos e os dentes, no entanto é um nutriente limitante no ambiente do aterro sanitário além de, quando presente em efluente e lançado em corpos receptores, poder acarretar eutrofização (LÔBO, 2006).

As remoções para esse parâmetro, especialmente no F1 (100 e 96,36%), representaram um dos resultados mais promissores da pesquisa, por ser um limitante do crescimento, de difícil alcance para a maioria dos sistemas de tratamento.

De acordo com a CONAMA nº430/2011, para o parâmetro fósforo, fica a critério do órgão ambiental competente definir padrões específicos para o lançamento de efluentes em corpos receptores com registro histórico de floração de cianobactérias, em trechos onde ocorra a captação para abastecimento público.

Reduções consideráveis das concentrações de fósforo foram alcançadas pelos tratamentos propostos por Carard (2018): 85,0% e Rodrigues (2007): de 50,6 a 90,1%. Dentre as experiências no tratamento de lixiviados estudadas por Lebron et al. (2021), a precipitação química foi descrita com os melhores resultados na redução de fósforo.

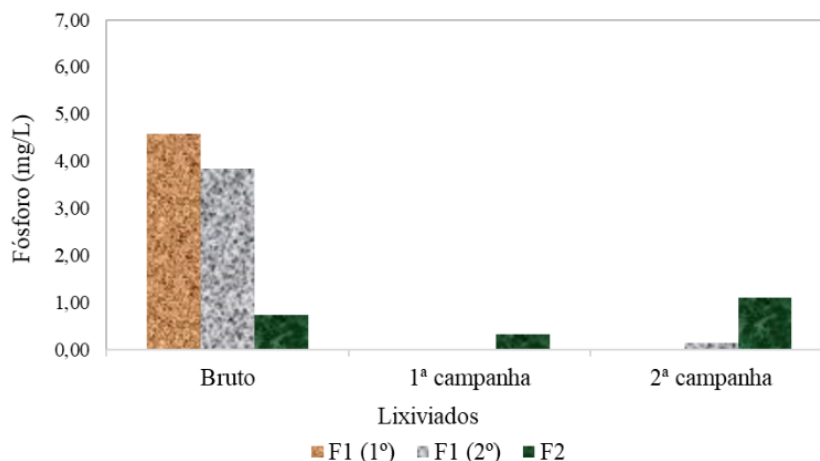


Figura 5: Comportamento do parâmetro Fósforo.

A DQO é um indicador da degradação do resíduo ao longo do tempo; quanto mais reduzidos forem os valores encontrados de DQO, mais antigo será o resíduo. Ela mede a quantidade de matéria orgânica que pode ser oxidada quimicamente (COSTA, 2021). Vicente (2021) ressalta que as concentrações de DQO e amônia são consideradas os principais indicativos de toxicidade aguda em um efluente.

O F1, segunda campanha, teve a maior redução (75,66%) para o parâmetro, contudo cabe observar que nos dois filtros as reduções mais representativas ocorreram na segunda campanha. Provavelmente, os resultados com as cinzas não foram melhores em virtude da sua composição química.

Lebron et al. (2021) observaram redução de DQO na ordem de 40% em tratamentos por lagoas de estabilização, 59% em sistemas de lodo ativado, 76% em filtros biológicos, de 60 a 81% em reator de biofilme de leito móvel e de 89,6% por biorreatores de membrana. Fujii et al. (2019) afirmaram ter alcançado, por meio de coagulação seguida da filtração, remoções de 82,4% de DQO.

As normas (CONAMA e COEMA, pertinentes) estabelecem como limite, para esse parâmetro, 200mg/L, não tendo sido atendido por nenhum dos filtros.

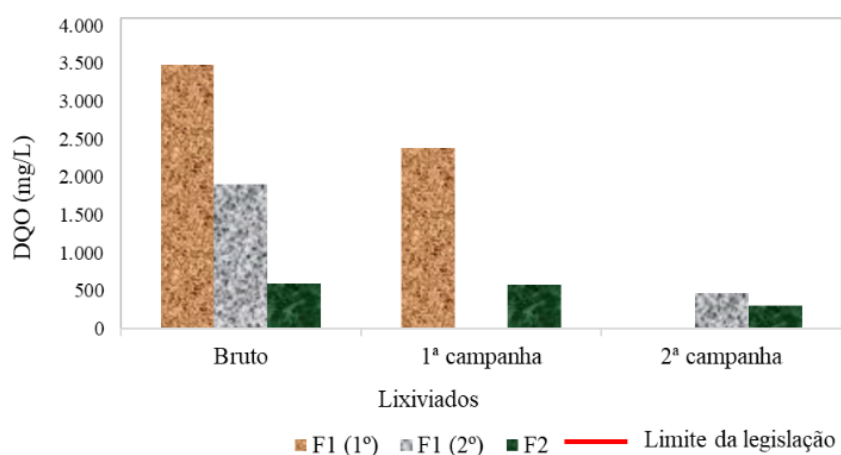


Figura 6: Comportamento do parâmetro DQO.

Os sólidos dissolvidos se constituem de alguns elementos incluídos na água, como bicarbonato e fósforo, que não sofrem decantação. Apesar de fundamentais para manutenção da vida, quando a concentração desses sólidos é elevada, a densidade da água pode ser prejudicada e influenciar diretamente no desenvolvimento de ambientes aquáticos. No lixiviado, a ação dos sólidos dissolvidos influencia diretamente a variabilidade dos íons presentes, interferindo diretamente na condutividade (SILVA, 2017).

O melhor desempenho na remoção desse parâmetro foi observado para o F1, segunda campanha (10,32%). Cabe observar que a elevação desse parâmetro nas primeiras campanhas em ambos os filtros pode ter sido ocasionada pelo arraste de elementos presentes no próprio meio filtrante utilizado. Silva (2021) alcançou 78,2% de remoção desse parâmetro com lagoas (anaeróbias, facultativa e seca) em um aterro sanitário. A legislação vigente não estabelece um valor específico de lançamento para esse parâmetro.

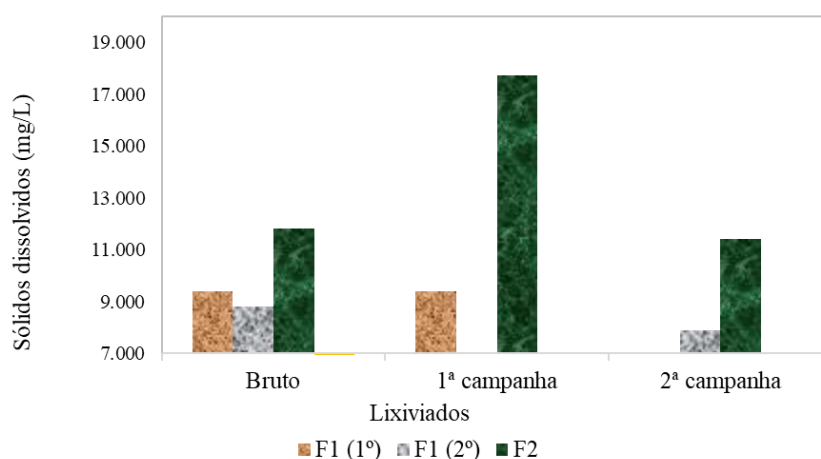


Figura 7: Comportamento do parâmetro Sólidos Dissolvidos.

O nitrato forma-se a partir da oxidação do nitrito, possui grande solubilidade e é carregado para os corpos d'água por meio da lixiviação, acarretando sua contaminação (MOREIRA, 2019). O melhor desempenho na remoção desse parâmetro foi observado em F1, primeira campanha (83,36%).

Silva (2021) alcançou 78,2% de remoção com lagoas (anaeróbias, facultativa e seca) em um aterro sanitário. Fujii et al. (2019) obtiveram redução de 98% ao aplicar o tratamento por stripping de amônia seguido do tratamento biológico ativado. No estudo sobre a eficiência de processos avançados na remoção de toxicidade de lixiviado de aterro sanitário, por meio do uso de membranas de nanofiltração, Reis (2014) obteve eficiência na redução do nitrato de 47%. O enquadramento nos padrões de lançamento admite 10 mg/L (CEARÁ, 2017), resultado alcançado pelos dois filtros desta pesquisa, em ambas as campanhas.

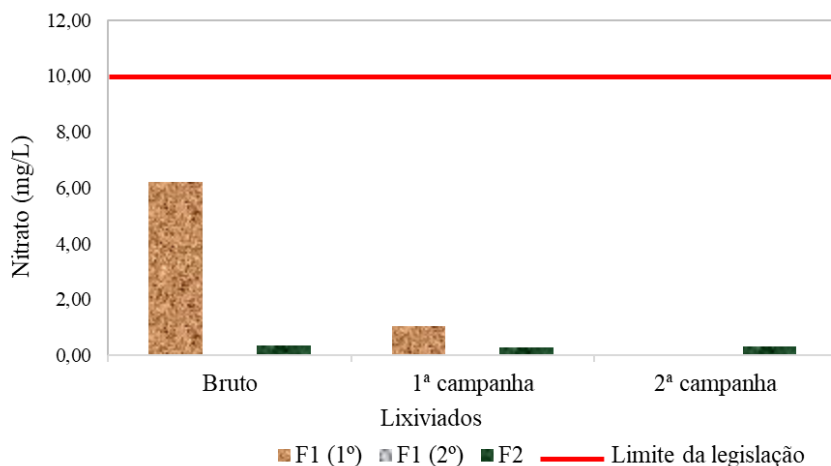


Figura 8: Comportamento do parâmetro Nitrato.

Wang et al. (2018) advertem que o nitrito é um cancerígeno reconhecido, não devendo ser negligenciado nos tratamentos, sob pena de causar substanciais efeitos prejudiciais no meio ambiente. Concordantemente, a literatura científica aponta os nitritos como responsáveis pelo aumento da toxicidade em lixiviados, após sua degradação (REIS, 2014).

A remoção desse parâmetro apresentou elevada eficiência nos dois filtros em estudo, sendo o maior alcance obtido para o F1, primeira campanha (100%).

O valor máximo para lançamento, estabelecido pelas resoluções pertinentes, é de 1 mg/L, resultado alcançado pelos dois filtros estudados, nas campanhas em que foi possível a verificação.

Após o tratamento por *stripping* de amônia seguido do tratamento biológico ativado, Fujii et al. (2019) alcançaram remoção de 96% de nitrito. Por sua vez, Reis (2014) obteve redução média de 48% ao aplicar nanofiltração após biorreator com membranas inoculado com levedura.

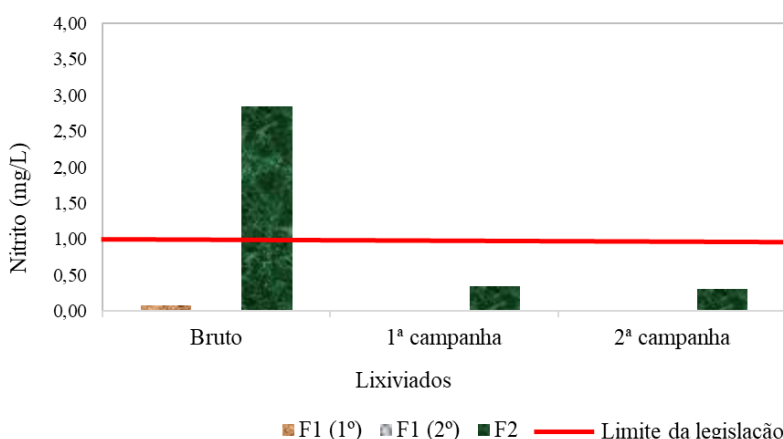


Figura 9: Comportamento do parâmetro Nitrito.

A turbidez é uma propriedade física dos fluidos que se traduz na redução da transparência devido à presença de materiais em suspensão, conferida pela presença de sólidos suspensos, de caráter tanto orgânico quanto inorgânico, e de microrganismos (SILVA, 2020).

Os dois filtros em estudo apresentaram eficiência na redução da turbidez, e o maior alcance foi observado no F1, primeira campanha (96,13%).

Para o enquadramento da turbidez, observou-se o estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, a qual determina que lançamentos em águas doces de classe 2 e 3 tenham no máximo 100uT, resultado alcançado nas duas campanhas realizadas para o F1.

No estudo desenvolvido por Cunha (2022), por meio da combinação entre adsorvente e coagulantes em dosagens específicas, obteve-se redução de 99,99% na turbidez. Rocha, Lucena e Porto (2020), por meio do uso do processo foto-fenton, usando a luz solar para potencializar as reações de degradação, obtiveram remoção de turbidez maior que 90%. Castilhos Junior, Dalsasso e Rohers (2010) perceberam um incremento na turbidez ao estudarem a filtração direta ascendente em coluna de carvão ativado, em pré-tratamento de lixiviados de aterros sanitários, fato atribuído pelos autores ao transpasse de flocos ocasionado no meio filtrante.

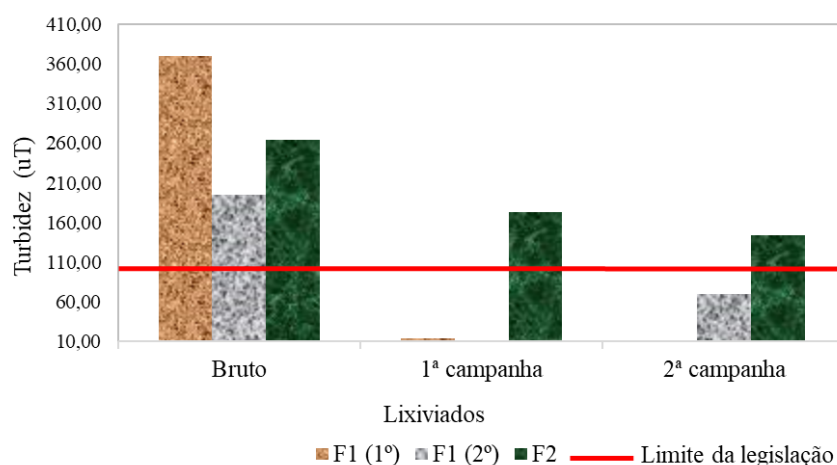


Figura 10: Comportamento do parâmetro Turbidez.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo, inédito no Brasil, buscou avaliar a influência da granulométrica das cinzas provenientes da incineração de Resíduos Sólidos Perigosos (RSP) como elemento de filtração no tratamento de lixiviado de aterro sanitário e demonstrou que o Filtro 1 (com granulometria selecionada entre 2,0 mm e 1,2 mm) foi o mais eficiente na redução da concentração percentual dos parâmetros, sendo: seis na primeira campanha (cor aparente 95,7%, fósforo 100%, DQO 31,6%, nitrato 83,4%, nitrito 100% e turbidez 96,1%) e quatro na segunda (cor aparente 62,9%, fósforo 96,4%, DQO 75,7%, sólidos dissolvidos 10,3%).

Com exceção do comportamento observado para fósforo (F2, segunda campanha), os dois filtros (F1 e F2) apresentaram comportamento semelhante de redução e elevação dos mesmos parâmetros, diferindo apenas no percentual alcançado por cada filtro.

Esta pesquisa é parte de uma pesquisa mais ampla em desenvolvimento, que vem ajudando a compreender as características físicas e químicas das cinzas do incinerador e seu comportamento como meio filtrante do lixiviado do Aterro de Caucaia, abrindo possibilidades para experimentos em maior escala, reduzindo sua disposição sobre o solo e inaugurando uma linha de investigação para a engenharia sanitária e ambiental. Além disso, comparar os resultados do lixiviado tratado no

sistema proposto com o tratado em outras tecnologias (já consolidadas) ajudará a entender em que medida as colunas de cinzas se aproximam dos padrões de lançamento (CONAMA e COEMA).

5 AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 408682/2021-3), à Marquise Ambiental e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará pelo apoio financeiro à pesquisa. Agradecimentos também são devidos aos laboratórios da UFC que forneceram resultados para caracterização de cinzas, em especial ao Laboratório de Raios-X do Departamento de Física e de Mecânica dos Solos e Pavimentação do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.

6 REFERÊNCIAS

- AGUIAR, B.; TABORDA, P.; AZEVEDO, A.; OLIVEIRA, A. (2002). *Utilização de cinzas volantes de incineração de RSU*. [Paper]. Paper apresentado no Seminário Betão para a Construção Sustentável – A Utilização de Materiais Não Tradicionais na Produção de Betões Correntes 2002, Lisboa, Portugal, abril de 2002. <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/19219/1/Lisboa.pdf>.
- APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23 Ed. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6.458**: Solo - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7.181**: Método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7.182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13.292**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14.545**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro, 2021.
- BRASIL. Resolução CONAMA n° 357, de 17 de março de 2005. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2005, 36 p.
- BRASIL. Resolução CONAMA n° 430, de 13 de maio de 2011. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2011, 9 p.

- CARARD, R. F. (2018). *Tratamento de lixiviado de aterro por ozonização fotocatalítica com TiO₂*. [Dissertação de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná]. <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3772/1/tratamentolixiviadoaterroozonizao.pdf>.
- CASTILHOS JUNIOR, A. B.; DALSSASSO, R. L.; ROHERS, F. Pré-tratamento de lixiviados de aterros sanitário por filtração direta ascendente e coluna de carvão ativado. *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 15, n. 4, p. 385-392, 2010.
- CEARÁ. 2017. Resolução COEMA nº 02, de 02 de fevereiro de 2017. CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE.
- CHÁVEZ-PORRAS, A.; RAMÍREZ-CONTRERAS, T.; CASALLAS-ORTEGA, N. Nitrificación em el tratamiento de lodos de lixiviados em um reactor biológico discontinuo secuencial – SBBR. *Revista Producción + Limpia*, v. 13, n. 1, p. 75-82, 2019.
- CLAVIER, K. A.; WATTS, B.; LIU, Y.; FERRARO, C. C.; TOWNSEND, T. G. Risk and performance assessment of cement made using municipal solid waste incinerator bottom ash as a cement kiln feed. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 146, p. 270-279, 2019.
- COSTA, A. F. (2021). *Análise de risco à saúde humana por uso do solo contaminado por chorume na área do antigo lixão de Maceió*. [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Alagoas]. <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/9543>.
- COUTINHO, N. C.; VIEIRA, C. M. F. Caracterização e incorporação de cinza de resíduo sólido urbano em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, v. 62, p. 249-255, 2016.
- CUNHA, J. A. R. Coagulação/floculação e adsorção de lixiviado de aterro sanitário na remoção de matéria orgânica e avaliação da toxicidade. 2022. 43 f. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, 2021.
- DIJKSTRA, J. J. *et al.* O significado geológico de novos materiais antropogênicos: Depósitos de resíduos industriais e subprodutos. *Antropoceno*, v. 28, p. 1-12, 2019.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 432: Agregados - Determinação das propriedades de forma por meio do Processamento Digital de Imagens (PDI) - Método de ensaio. Brasília, 2020.
- Lei nº 10.340/2015 da Prefeitura Municipal de Fortaleza. (2015) Diário Oficial do Município. <https://urbanismoemeioambiente.fortaleza.ce.gov.br/images/agefis/PDFs/RSOLIDOS/Lei-n-10.340.pdf>.
- FUJII, E. H.; GALVÃO, R. B.; ROSA, J. L.; FERNANDES, F.; KURODA, E. K. Composição granulométrica do filtro ascendente para pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário. *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 24, n. 3, p. 525-535, 2019.
- GODOI, M. C. S. (2019). *Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por meio do processo de*

eletrocoagulação e filtração. [Monografia de graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná]. <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/12165>.

- IBIAPINA, D. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; DIOGENES, L. M.; DA MOTTA, L. M. G.; & DE FREITAS, S. M. Proposição de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados caracterizados com o uso do processamento digital de imagens a partir de materiais oriundos do Brasil. *Transportes*, v. 26, n. 4, p. 116-128, 2018.
- LEBRON, Y. A. R.; MOREIRA, V. R.; BRASIL, Y. L.; SILVA, A. F. R.; SANTOS, L. V. S.; LANGE, L. C.; AMARAL, M. C. S. A survey on experiences in leachate treatment: common practices, differences worldwide and future perspectives. *Journal of Environmental Management*, v. 288, p.1-20, 2021.
- LI, X.; LIU, Z.; LV, Y.; CAI, L.; JIANG, D.; JIANG, W.; JIAN, S. Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, v. 178, p. 175-182, 2018.
- LIU, Y.; SIDHU, K. S.; CHEN, Z.; YANG, E. Alkali-treated incineration bottom ash as supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, v. 179, p. 371-378, 2018.
- LÔBO, E. M. P. S. (2006). *Estudo comparativo das características dos líquidos percolados gerados no Aterro Metropolitano – PB e no Aterro da Muribeca – PE*. [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco]. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5783>.
- MOREIRA, J. V. F. (2019). *DNA metabarcoding da microbiota do chorume do aterro sanitário da cidade de Foz do Iguaçu-PR visando os processos de biorremediação*. [Monografia de graduação, Universidade Federal da Integração Latino-Americana]. <http://dspace.unila.edu.br/123456789/5625>.
- PATRA, S.; WHAUNG, S. T.; KWAN, W. L. Analysis of heavy metals in incineration bottom ash in Singapore and potential impact of pre-sorting on ash quality. *Energy Procedia*, v. 143, p. 454-459, 2017.
- PESENTI, M. E. A.; MARQUES, T. A.; CAMPOS, V. A.; URATA, S. L.; PRATES, K. V. M. C. Avaliação do potencial biorremediador dos fungos *Candida spp.* e *Trichophyton spp.* no tratamento de lixiviado proveniente de aterro sanitário. *HOLOS*, Ano 39, v. 5, e16307, p. 1 – 14, 2023.
- PINTO, B. H. A. (2018). *Estudo de argamassas com adição de cinzas do processo de incineração de resíduos sólidos dos serviços de saúde*. [Monografia de graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte]. <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/40449>.
- REIS, B. G. (2014). *Avaliação da eficiência de processos avançados na remoção de toxicidade de lixiviado de aterro sanitário*. [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais]. <http://hdl.handle.net/1843/BUBD-9MPLGK>.
- ROCHA, E. M.; LUCENA, L. G.; PORTO, C. A. Otimização do processo foto-fenton solar no tratamento de lixiviados de aterros sanitários. *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 16, n. 41, p. 202-215, 2020.

- RODRIGUES, M. C. (2007). *Tratamento eletrolítico de lixiviado de aterro sanitário*. [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina]. <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/90546>.
- ROEHRS, F. (2007). *Tratamento físico-químico de lixiviado de aterro sanitário por filtração direta ascendente*. [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina]. <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/90200>.
- SÁ, L. F.; JUCÁ, J. F. T.; MOTTA SOBRINHO, M. A. Tratamento do lixiviado de aterro sanitário usando destilador solar. *Ampli-Água*, v. 7, n. 1, p. 204-217, 2012.
- SILVA, A. C.; SILVA, E. M. S.; LIMA, F. V.; SANTOS, M. S. Degradação de meios filtrantes na filtragem a vácuo. *HOLOS*, Ano 30, v. 3, p. 309 – 318, 2013.
- SILVA, B. L.; BRUM, M. L.; VELASQUEZ, R. P.; LIMA, B. D.; SWAROWSKY, A.; PINTO, J. S. Pré-tratamento para redução dos parâmetros físicos-químicos do lixiviado gerado em aterros sanitários. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 9, p. 1-10, 2021.
- SILVA, C. Z. (2017). *Codigestão anaeróbia de lixiviado de aterro sanitário e glicerol*. [Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná]. <https://tede.unioeste.br/handle/tede/3065>.
- SILVA, D. M. (2021). *Caracterização do sistema de tratamento de resíduos sólidos urbanos de um aterro sanitário no interior da Amazônia legal*. [Monografia de graduação, Faculdade de Educação e Meio Ambiente]. <http://repositorio.faema.edu.br:8000/jspui/handle/123456789/2997>.
- SILVA, M. C. C. P. (2020). *Remoção de nitrogênio e fósforo de lixiviado de aterro sanitário aplicado a *Chlorella sp.* imobilizada em matriz de alginato de cálcio*. [Tese de doutorado, Universidade Estadual da Paraíba]. <http://tede.bc.uepb.edu.br/jspui/handle/tede/4000>.
- SOUTO, G. D'A. B. (2009). *Lixiviado de aterros sanitários brasileiros - estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar ("stripping")*. [Tese de doutorado, Universidade de São Paulo]. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-19022009-121756/pt-br.php>.
- VIANA, J. A. (2013). *Estimativa da quantidade de resíduos de serviços de saúde (RSS) incinerada por nove hospitais públicos de Fortaleza-CE*. [Monografia de graduação, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará].
- VICENTE, B. M. (2021). *Avaliação de processos para tratamento de lixiviados de aterros sanitários: análise comparativa de estudos desenvolvidos na UFRJ*. [Monografia de graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro]. <http://hdl.handle.net/11422/15802>.
- WANG, K.; LI, L.; TAN, F.; WU, D. Treatment of landfill leachate using activated sludge technology: a review. *Archaea*, p. 1-10, 2018.

ZHU, W.; CHEN, X.; STRUBLE, L. J.; YANG, E. H. Characterization of calcium-containing phases in álcali-activated municipal solid waste incineration bottom ash binder through chemical extraction and deconvoluted Fourier transform infrared spectra. *Journal of Cleaner Production*, v. 192, p. 782-789, 2018.

COMO CITAR ESTE ARTIGO

Moura et al. M. C. C. INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DAS CINZAS DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS (RSP) NA FILTRAÇÃO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO. *HOLOS*, 5(39). Recuperado de <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/16328>

ABOUT THE AUTHORS

M. C. C. MOURA

Estudante do Mestrado em Tecnologia em Gestão Ambiental (PGTGA) do IFCE. Membro do Grupo de Estudos, Projetos e Pesquisas em Resíduos Sólidos do IFCE.

E-mail: mcristina_cm@yahoo.com.br

<https://orcid.org/0009-0008-6679-0996>

G. O. SANTOS

Doutor em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Professor Titular do IFCE e do PGTGA. Coordenador do Grupo de Estudos, Projetos e Pesquisas em Resíduos Sólidos do IFCE.

E-mail: gemmelle@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1852-8770>

M. L. SILVA

Mestre pelo PGTGA. Membro do Grupo de Estudos, Projetos e Pesquisas em Resíduos Sólidos do IFCE.

E-mail: contatomichaells@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9481-5854>

R. A. C. SILVA

Doutor em Geologia pela UFC. Professor Pleno I da Secretaria da Educação. Técnico do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFC. Membro do Grupo de Estudos, Projetos e Pesquisas em Resíduos Sólidos do IFCE.

E-mail: roberto@det.ufc.br

<https://orcid.org/0000-0003-2214-4999>

N. D. LEITE

Mestre pelo PGTGA. Gerente de projetos do LABIFOR (Prefeitura Municipal de Fortaleza). Membro do Grupo de Estudos, Projetos e Pesquisas em Resíduos Sólidos do IFCE.

E-mail: nirlania.dl@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3219-4172>

J. B. S. BASTOS

Doutora em Engenharia de Transportes pela UFC. Professora do PGTGA. Membro do Grupo de Estudos, Projetos e Pesquisas em Resíduos Sólidos do IFCE. Atualmente pesquisa na área de Engenharia de Transportes, com ênfase em Infraestrutura de Transportes.

E-mail: juceline.santos@ifce.edu.br

<https://orcid.org/0000-0002-1125-2196>

Editor: Francinaide de Lima Silva Nascimento

Ad Hoc Reviewer: Marina Batalini De Macedo e Patrícia Martins Diniz



Submitted June 24, 2023

Accepted November 31, 2023

Published December 18, 2023